

НЕКОТОРЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛАВЛЕНОГО КВАРЦА ПРИ ВЫСОКИХ ЧАСТОТАХ, ПОВЫШЕННЫХ НАПРЯЖЕНИЯХ И ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Б. И. ВОРОЖЦОВ

Введение

Развитие радиотехники и электротехники зачастую ставит электроизоляционные материалы в весьма жесткие условия эксплуатации, которые не всегда выдерживает даже такой высококачественный электроизоляционный материал, как плавленый кварц. Последний, находясь в сильных электрических полях высокой частоты и при повышенной температуре, испытывает сильный разогрев, что ведет к гибели дорогостоящего прибора.

Этот сильный разогрев кварца естественно связать с резким возрастанием диэлектрических потерь в нем. Однако природа высокочастотных диэлектрических потерь в плавленом кварце при высоких температурах, по причине отсутствия надежных методов измерения угла диэлектрических потерь, до сих пор неизвестна. Имеющиеся данные о диэлектрических потерях в плавленом кварце, относящиеся к области температур 20—400°C, не позволяют видеть причины его резкого разогрева при более высоких температурах.

Задачей настоящей работы являлось исследовать механизм диэлектрических потерь в плавленом кварце при высоких частотах и высоких температурах.

Параллельной задачей была разработка методики измерения угла диэлектрических потерь в сравнительно сильных полях высокой частоты, пригодной при высоких температурах, так как существующие методы по ряду причин не позволяют производить исследования при температурах, превышающих 400°C. Причины эти, в основном, заключаются в том, что большинство существующих методов измерения угла диэлектрических потерь весьма чувствительны к всевозможным паразитным связям, исключить влияние которых весьма затруднительно.

Свободным от этого недостатка является калориметрический метод, который и был взят за основу при разработке нашей методики.

Методика измерения угла диэлектрических потерь

Расчет угла диэлектрических потерь в предлагаемой методике производится из сопоставления выделившегося в результате диэлектрических потерь количества тепла и количества тепла, измеренного по повышению температуры диэлектрика, причем при выводе формулы учитываются потери тепла в результате теплообмена образца с окружающей средой.

Таким образом можно записать:

$$0,24CV_{эфф}^2 \omega \operatorname{tg} \delta .dt = \lambda mdT + h(T - T_0)dT, \quad (1)$$

где C — емкость образца,
 $V_{эфф}$ — приложенное напряжение,
 ω — круговая частота, при которой производится измерение,
 λ — удельная теплоемкость образца,
 h — коэффициент теплообмена.

Решение этого уравнения записывается в виде:

$$T - T_0 = \Delta T = \frac{A}{h} \left(1 - e^{-\frac{h}{\lambda m} t} \right), \quad (2)$$

$$\text{где } A = 0,24 C V_{эфф}^2 \omega \operatorname{tg} \delta. \quad (3)$$

Если $\frac{h}{\lambda m} t \ll 1$, то разлагая $e^{-\frac{h}{\lambda m} t}$ в ряд и ограничиваясь первым членом разложения, получим.

$$\Delta T = \frac{A}{\lambda m} t, \quad (4)$$

т. е. при определенных условиях можно не учитывать теплообмена образца с окружающей средой.

Экспериментальная оценка зависимости ΔT от времени t , изображенная на рис. 1, показывает, что простая зависимость (4) практически вполне достижима. Линейная зависимость нагрева ΔT от времени сохраняется в течение 5—6 минут, причем величина нагрева образца равна примерно 5—10°C, т. е. может быть измерена с большой точностью.

Следует отметить, что наряду с упрощением расчетных формул работа в нестационарном режиме нагрева значительно ускоряет процесс измерения (вместо часов — минуты). На это в свое время обращали внимание Рэйс и Леонард [1], авторы нестационарного метода измерения угла диэлектрических потерь по способу замещения.

Как нетрудно убедиться, уравнение (1) описывает процесс нагрева всего объема диэлектрика, и потому справедливо лишь тогда, когда измеряемая температура тела равна средней (интегральной) температуре [2], т. е.

$$T = \bar{T} = \frac{1}{\Omega} \int_{\Omega} T d\Omega. \quad (5)$$

Так как нагрев образца измеряется нами по повышению температуры его внешней поверхности, то в зависимости от распределения поля в образце мы будем измерять разную температуру. В случае однородного поля температура внешней поверхности образца равна средней (интегральной) температуре, ибо во всех точках образца выделяется одинаковое количество тепла. В неоднородных полях, где в различных точках выделяется разное количество тепла, измеряемая температура будет отличаться от средней (интегральной) температуры. Процесс теплопроводности будет вы-

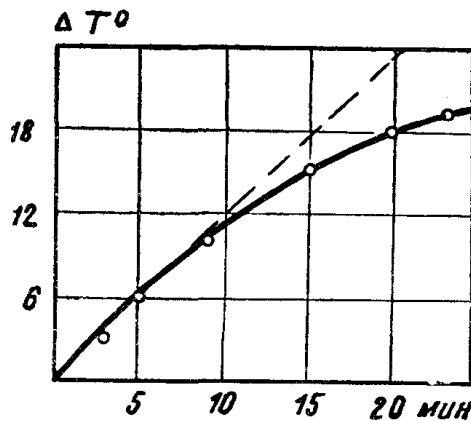


Рис. 1

равнивать температуру в образце, приближать ее к средней (интегральной). Нагрев диэлектрика в этом случае будет описываться неоднородным уравнением теплопроводности. Для нашего случая (образцы представляют собой трубки плавленого кварца с радиусами R_1 и R_2 большой длины, $l > 2R_2$) это уравнение запишется в виде:

$$K \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + F(r) = \lambda \rho \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (6)$$

где K — коэффициент теплопроводности,

$F(r) = \frac{M}{r^2}$ — плотность источников,

$$M = 0,24 \frac{\omega \varepsilon}{4\pi} \operatorname{tg} \delta \frac{V_{\text{эфф}}^2}{\ln^2 R_2 / R_1}. \quad (7)$$

Начальные и краевые условия для простоты положим равными:

$$T(r, 0) = 0.$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{R_1, R_2} = 0.$$

Решение этого уравнения запишется в виде:

$$T(r, t) = \frac{2M \ln \frac{R_2}{R_1}}{(R_2^2 - R_1^2) \rho \lambda} \cdot t + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\int_{R_1}^{R_2} \frac{M}{\rho \lambda r} \cdot I_0 \left(n\pi \frac{r}{d} \right) dr}{\int_{R_1}^{R_2} r \left[I_0 \left(n\pi \frac{r}{d} \right) \right]^2 dr} \times \\ \times \frac{I_0 \left(n\pi \frac{r}{d} \right) d^2}{(n\pi)^2 \cdot a^2} \cdot \left(1 - e^{-\left(\frac{n\pi}{d} \right)^2 \cdot a^2 t} \right). \quad (8)$$

Величина $\frac{2M \ln \frac{R_2}{R_1}}{(R_2^2 - R_1^2) \rho \lambda} \cdot t$ представляет собою среднюю (интегральную) температуру.

Оценка суммы, входящей в выражение (8), которая отличает температуру в данной точке тела от средней (интегральной), проведенная для начального периода нагрева, приводит к следующему соотношению:

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\int_{R_1}^{R_2} \frac{M}{\rho \lambda r} \cdot I_0 \left(n\pi \frac{r}{d} \right) dr}{\int_{R_1}^{R_2} r \left[I_0 \left(n\pi \frac{r}{d} \right) \right]^2 dr} \cdot \frac{I_0 \left(n\pi \frac{r}{d} \right) \cdot d^2}{(n\pi)^2 \cdot a^2} < \frac{2M \ln \frac{R_2}{R_1}}{(R_2^2 - R_1^2) \rho \lambda} \times \\ \times \frac{d_2}{a^2 \pi^2} \left(\frac{R_2^2 - R_1^2}{2r^2 \ln \frac{R_2}{R_1}} - 1 \right), \dots, \quad (9)$$

где d — толщина образца,

$$a^2 = \frac{K}{\lambda \rho}.$$

Выражение (8), таким образом, можно представить в виде:

$$T(r, t) \leq \frac{2M \ln \frac{R_2}{R_1}}{(R_2^2 - R_1^2) \rho \lambda} \left\{ t - \frac{d^2}{\pi^2 a^2} \left(1 - \frac{R_2^2 - R_1^2}{2r^2 \ln \frac{R_2}{R_1}} \right) \right\}. \quad (10)$$

Подставляя в (10) средние размеры образцов ($R_2 = 0,9$ см., $R_1 = 0,6$ см), получим для температуры внешней поверхности следующее значение:

$$T(R_2, t) < \frac{2M \ln \frac{R_2}{R_1}}{(R_2^2 - R_1^2) \rho \lambda} \cdot (t - 0,4) \approx \frac{2M \ln \frac{R_2}{R_1}}{(R_2^2 - R_1^2) \rho \lambda}. \quad (11)$$

Таким образом, измеряемая на внешней поверхности образца температура близка к его средней (интегральной) температуре. Следовательно, уравнение (1) и все выводы из него справедливы. Т. е. справедлива формула (4), которая верна, если $t = 4-5$ мин. Формулы (4) и (11) ограничивают время нагрева с двух сторон, а именно:

$$0,4 \text{ сек} < t < 240 \text{ сек}. \quad (12)$$

Как показали опыты, такое время вполне достаточно для заметного нагрева образца.

Учтем еще одно обстоятельство. Во всех предыдущих рассуждениях мы не касались того факта, что угол диэлектрических потерь не остается во время измерения постоянным, а вследствие нагрева образца меняется по закону:

$$\operatorname{tg} \delta = \operatorname{tg} \delta_0 \cdot e^{B \frac{T - T_0}{TT_0}}. \quad (13)$$

Здесь T_0 — температура, при которой производится измерение, т. е. температура окружающей среды,

$\operatorname{tg} \delta_0$ — тангенс угла диэлектрических потерь при T_0 ,

T — температура, до которой нагрелся кварц в результате диэлектрических потерь,

$B = 10^4$ — (определена из наших измерений температурной зависимости угла диэлектрических потерь).

Выбирая время нагрева таким, что теплообменом с окружающей средой можно пренебречь, и учитывая условие (13), запишем уравнение (1) в виде:

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{A_0}{\lambda m} \cdot e^{B \frac{T - T_0}{TT_0}}, \quad (14)$$

где $A_0 = 0,24 \omega C V_{эфф}^2 \cdot \operatorname{tg} \delta_0$

Максимальный нагрев при 900°C составлял около 20°C за время $t = 30$ сек. Отсюда $B \frac{T - T_0}{TT_0} = 10^4 \frac{1193 - 1173}{1193 \cdot 1173} = 0,14$. Это позволяет

упростить задачу. После несложных выкладок решение уравнения (14) принимает вид:

$$\Delta T \left(1 - \frac{B}{T_0} + \frac{2B}{T_0 + T} \right) = \frac{A_0}{\lambda m} \cdot t. \quad (15)$$

Подставляя вместо B , T и T_0 их значения, получаем:

$$0,928\Delta T = \frac{A_0}{\lambda \cdot m} \cdot t. \quad (16)$$

Это выражение позволяет считать, что с достаточной степенью точности можно не учитывать изменение угла диэлектрических потерь плавленого кварца за счет повышения температуры образца во время отдельного измерения.

Подставляя в (4) значение A из (3), получаем основную расчетную формулу для угла диэлектрических потерь в виде:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\lambda m \Delta T}{0,24 \omega C V_{эфф}^2 \cdot t}. \quad (17)$$

Эта формула верна как для случая однородного поля, так и для неоднородного при условии, что образец имеет достаточно малую толщину.

В предлагаемой методике величины теплоемкости (λ), массы (m) и емкости (C) образца должны определяться либо отдельными измерениями, либо при известной плотности (ρ) и диэлектрической проницаемости (ϵ) аналитически (для цилиндрического конденсатора

$$m = \rho \pi (R_2^2 - R_1^2) l, \quad C = \frac{\epsilon l}{2 \ln \frac{R_2}{R_1}}).$$

Это существенный недостаток калориметрических методов вообще.

Определение других величин, входящих в формулу (17), производится следующим образом: t — секундомером, ω — волномером, ΔT и $V_{эфф}$ с помощью описываемой ниже установки.

Прежде чем описывать установку остановимся на важном вопросе при измерении угла диэлектрических потерь — вопросе об электродах.

Исследование пригодности различных электродов для измерения диэлектрических потерь в плавленом кварце при высоких температурах

Вопрос об электродах становится особенно острым при высокотемпературных измерениях угла диэлектрических потерь, где электроды должны быть стабильными во всем температурном интервале и не реагировать с образцом. Высокая частота и повышенное напряжение накладывают свои требования к материалу электродов.

Нами был исследован ряд электродов: никелевые цилиндры, прикладываемые снаружи и изнутри к образцу, порошковые электроды, серебряные электроды, нанесенные на образец вжиганием пасты, и, наконец, „воздушные“ электроды.

Первые два вида электродов оказались непригодными, так как невозможно практически избежать наличия между образцом и электродом воздушных промежутков, ионизация которых значительно искажает результаты измерения.

Более подходящими оказались серебряные и „воздушные“ электроды.

Исследование пригодности серебряных электродов показало, что с их помощью можно производить измерения угла диэлектрических потерь плавленого кварца лишь до 600°C . Повторяемость результатов при этом весьма хорошая.

Измерения при температурах выше 600°C ввиду большой испаряемости электродов и взаимодействия серебра с образцом производить нельзя. Здесь повторные измерения дают другие результаты.

Воздушные электроды представляют собой следующее устройство (рис. 2). Здесь, как видно из рис., на котором приведен разрез цилиндрического конденсатора с измеряемым образцом, возможное взаимо-

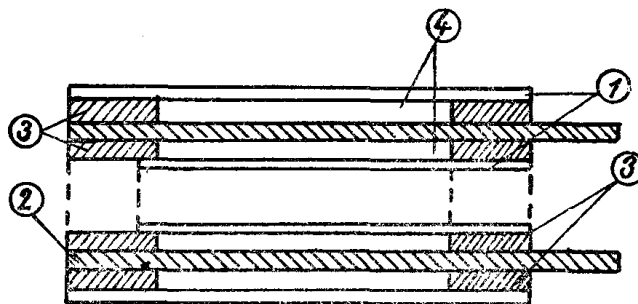


Рис. 2. I. — Металлические электроды.

2 — Образец. 3 — Кварцевые прокладки.

4 — Воздушная прослойка.

действие металлического электрода и образца при высоких температурах ликвидировано, так как металлический электрод отделен от образца воздушной прослойкой. Если взять образец достаточной длины и спай термопары поместить на образце на одинаковом расстоянии от кварцевых прокладок, расположенных у краев электродов, то ввиду значительной длины образца и малой теплопроводности кварца нагрев краев образца под прокладками не будет сказываться на нагрев термопары. Результаты измерения зависимости нагрева термопары от положения спая на образце представлены на рис. 3.

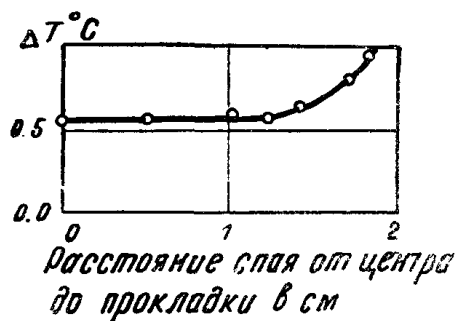


Рис. 3. Зависимость нагрева термопары от положения спая на образце.

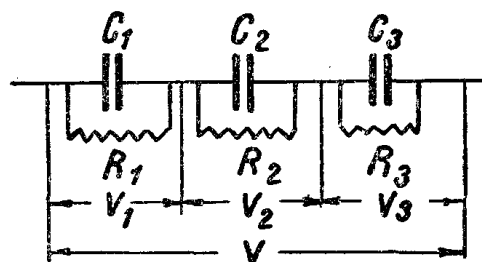


Рис. 4

Обозначим полное напряжение на конденсаторе через V , а на образце через V_2 . Найдем зависимость V_2 от V и потерь в образце. Для этого рассмотрим эквивалентную схему системы воздух-кварц-воздух, изображенную на рис. 4. Исходя из этой схемы, можно записать:

$$V_2 = \frac{V}{1 + C_2 \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_3} \right) (1 - j \operatorname{tg} \delta)} \quad (18)$$

при условии, что $\operatorname{tg} \delta_1 = \operatorname{tg} \delta_3 = 0$, как $\operatorname{tg} \delta$ воздуха. Это условие верно лишь тогда, когда воздух в воздушных промежутках не ионизируется. Отсюда требуется подбирать оптимальное рабочее напряжение. Расчеты по фор-

мулам Пика [3] для нашего случая (радиус внутреннего электрода $R_0 = 0,45$ см, радиусы образца: $R_1 = 0,6$, $R_2 = 0,9$ см и радиус наружного электрода $R_3 = 1,25$ см) дают для начальной (коронной) напряженности поля на внутреннем электроде следующее значение: $E_n = 13,7$ кВ/см. Максимальная же напряженность поля на внутреннем электроде при $V_{эфф} = 1200$ в равна: $E_m = 6$ кВ/см. Таким образом, рабочее напряжение, равное 1200 в, вполне пригодно.

Обратимся к выражению (18). Можно убедиться, что первые производные от V_2 по частоте и температуре не равны нулю, если не равны нулю соответствующие производные $\text{tg}\delta$. Если $\text{tg}\delta$ имеет температурный или частотный максимум, то при этой температуре или частоте V_2 минимально.

Решая совместно уравнения (17) и (18), получаем следующую формулу для расчета угла диэлектрических потерь при измерении с „воздушными“ электродами:

$$\text{tg}\delta = \frac{V_{эфф}^2}{2Bb^2} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{4B^2b^2(1+b)^2}{V_{эфф}^4}} \right), \quad (19)$$

где $B = \frac{\lambda m \Delta T}{0,24 \omega C_2 t}$.

При $\text{tg}^2\delta \ll 1$ корень в формуле (19) можно представить приближенно. Тогда формула (19) заменится более простой:

$$\text{tg}\delta = \frac{\lambda m \Delta T}{0,24 \omega C_2 V_{эфф}^2 \cdot t} (1+b)^2. \quad (20)$$

Формулы (19) и (20) являются искомыми формулами для расчета угла диэлектрических потерь плавленого кварца воздушными электродами. Исследование температурного хода угла диэлектрических потерь плавленого кварца показало, что при измерениях с „воздушными“ электродами наблюдается полное совпадение точек прямого и обратного хода, а также и повторного измерения, хотя эти измерения велись до температур, превышающих 1000°C. Этого не мог дать ни один из рассмотренных ранее электродов. Таким образом, применение „воздушных“ электродов, препятствуя диффузии примеси из металла в образец, дает возможность определять диэлектрические потери в „чистом“ диэлектрике в широкой области температур, вплоть до температуры 1000°C. Кроме того, подобное устройство электродов соответствует тем условиям, в которых работает кварц в практических установках.

Чувствительность методики (по $\text{tg}\delta$) при применении „воздушных“ электродов порядка $5 \cdot 10^{-4}$ (при серебряных электродах— $5 \cdot 10^{-5}$). Максимальная погрешность в измерении угла диэлектрических потерь при высоких температурах (600—1000°C) составляет 30-40%, при серебряных электродах—20-30%. Погрешность уменьшается с повышением температуры.

Таким образом, несмотря на некоторое снижение чувствительности и точности метода, применение „воздушных“ электродов вполне оправдано.

Блок—схема установки

Установка состоит из высокочастотного генератора, измерительного контура с приборами для измерения напряжения и нагрева образца токами высокой частоты и тигельной электропечи. Общая схема установки приведена на рис. 5.

Генератор высокочастотных колебаний, собранный на лампе ГУ—500, давал на выходе мощность до 0,5 *квт* в частотном диапазоне 10—40 *мгц*.

Измерительный контур, индуктивно связанный с контуром автогенератора, состоит из катушки самоиндукции L , подстроечного конденсатора C^0 и конденсатора C с диэлектриком.

Термопара T , тесно прижатая к образцу, служит для определения высокочастотного нагрева и для измерения температуры образца (температуры печи). Эти две операции осуществляются попеременным подключением ее либо к прибору, проградуированному в градусах столбчатой шкалы (при определении температуры печи), либо к дифференциальному гальванометру (при измерении высокочастотного нагрева образца).

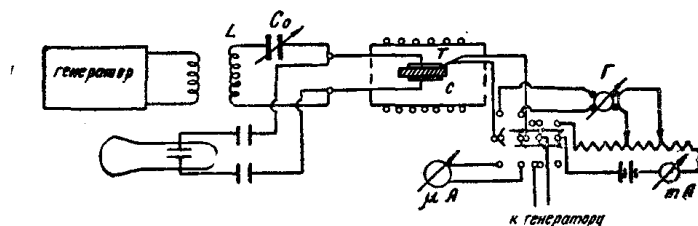


Рис. 5

При определении высокочастотного нагрева при повышенных температурах термоэлектродвижущая сила, развиваемая термопарой вследствие нагрева образца в печи, компенсируется при помощи специальной схемы, подключенной ко второй катушке гальванометра ¹⁾.

Определение нагрева производится путем экстраполяции кривой изменения температуры печи и кривой остывания образца на время выключения поля.

Для определения напряжения на образце параллельно ему через емкостной делитель напряжения включается осциллографическая трубка. Напряжение определяется по величине размытия пятна на экране осциллографической трубки, для чего это устройство предварительно градуируется.

Исследование электрических свойств плавленого кварца при высоких частотах и высоких температурах

Исследованию подвергались три вида плавленого кварца: Ленинградский, Московский и кварц из породы.

Ленинградский и Московский кварц, названный так по месту изготовления, имел форму трубок различного диаметра стандартной длины (100 *см*). В качестве исследуемого образца служил отрезок такой трубки длиной в 8—10 *см*. Все образцы (было исследовано 50 образцов Ленинградского и Московского кварца) содержат незначительное количество газовых включений в виде тонких капилляров, направленных вдоль трубки.

В состав этих образцов входят в виде примеси: магний (0,03—0,1%) медь (0,03—0,1%) и железо (0,01%). Химический состав определялся полуколичественным спектральным анализом.

Кварц из породы, приготовленный путем расплавления кристаллов дымчатого кварца, имел форму дисков и содержал большое количество газовых пузырьков.

¹⁾ Возможность применения компенсационного устройства для определения величины диэлектрического нагрева ΔT при повышенных температурах была опробована А. М. Вендериным и А. П. Вяткиным.

Исследование температурно-частотной зависимости угла диэлектрических потерь плавленого кварца привело к следующему. Как показывает рис. 6, где представлена типичная зависимость угла диэлектрических потерь плавленого кварца от температуры, диэлектрические потери в плавленом кварце можно разделить на две части: низкотемпературную (до 450—500°C), где угол диэлектрических потерь почти не зависит от температуры и мал по абсолютной величине, и высокотемпературную, с резким возрастанием диэлектрических потерь от температуры. Как известно, такой температурный ход угла диэлектрических потерь является характерным для стекол. Только у стекол возрастание угла диэлектрических потерь, определяющееся количеством и характером присутствующих в них примесей, наступает при более низких температурах.

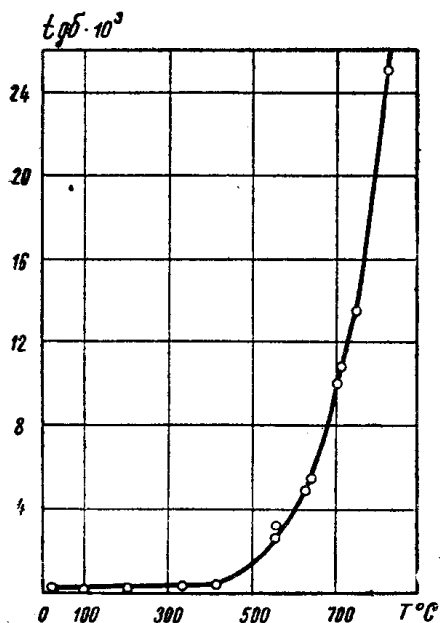


Рис. 6. Температурная зависимость угла диэлектрических потерь для кварца МА, $f = 25 \text{ мГц}$.

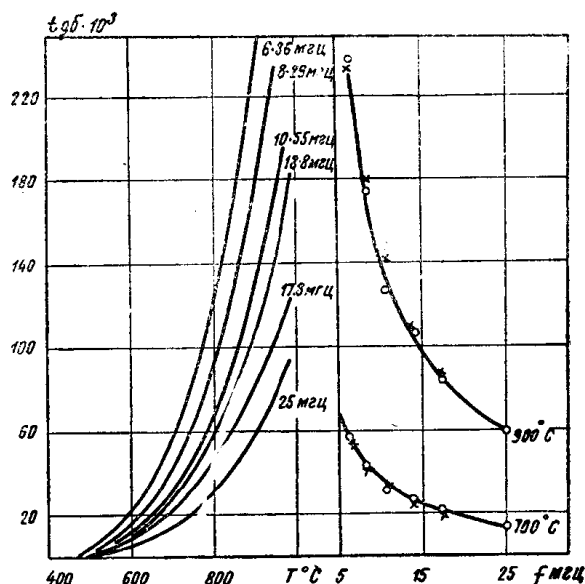


Рис. 7. Частотная зависимость $\text{tg } \delta$ для кварца ЛД
× — рассчитанные по точке $f = 25 \text{ мГц}$

Обратимся к неисследованной ранее, высокотемпературной части диэлектрических потерь в плавленом кварце. Температурно-частотная зависимость угла диэлектрических потерь представлена на рис. 7, из которой следует, что угол диэлектрических потерь обратно пропорционален частоте. Это, как известно, является основной характеристикой омических потерь.

Кроме того, при высокой температуре наблюдается равенство измеренного угла диэлектрических потерь и рассчитанного по проводимости образца, а также одинаковый нагрев образца током высокой частоты и постоянным током при одном и том же напряжении (рис. 8 и 9).

Все эти факты позволяют заключить, что высокотемпературная часть диэлектрических потерь в плавленом кварце определяется сквозной проводимостью.

Исследование температурно-частотной зависимости диэлектрической проницаемости также подтверждает этот вывод (диэлектрическая проницаемость не зависит ни от температуры, ни от частоты). Измерение ϵ производилось на куметре КВ—1.

В процессе исследования угла диэлектрических потерь плавленого кварца при высоких температурах выяснился весьма интересный факт—по-

нижение угла диэлектрических потерь в результате термообработки образца при высоких температурах (1100—1300°C) в течение нескольких часов.

Подробное исследование влияния высокотемпературной термообработки показывает, что снижение угла диэлектрических потерь плавленного кварца при этом составляет 40—50% (рис 10). Как видно из рисунка, шлифовка измененного поверхностного слоя (белый налет—кristобалит) и вторичный обжиг не приводит к дальнейшему изменению угла диэлектрических потерь образца, подвергнутого термообработке.

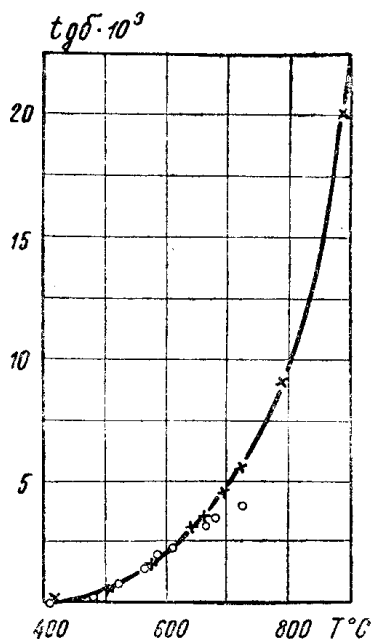


Рис. 8. × — $\text{tg } \delta$ измерен при 25 мГц.

О — $\text{tg } \delta$, вычисленный по (6);
кварц ПЕ 50.

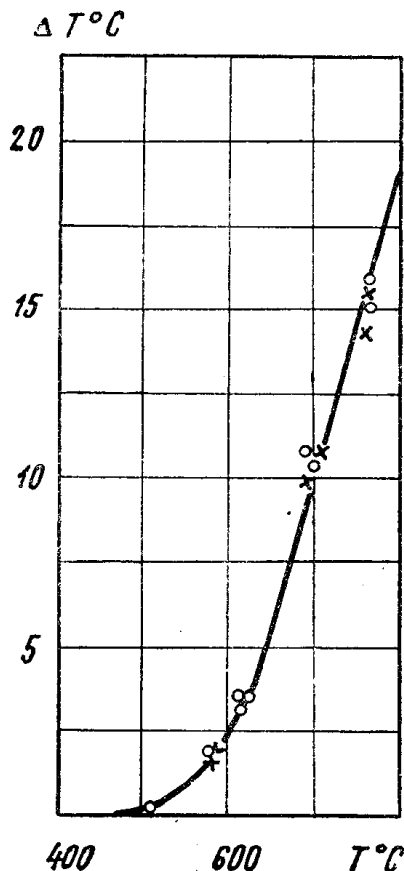


Рис. 9. × — нагрев при 25 мГц

О — нагрев постоянным током;
кварц ПЕ 50.

Изучение влияния времени температурной обработки на величину угла диэлектрических потерь показывает, что процесс, обуславливающий уменьшение диэлектрических потерь, за 2—3 часа полностью завершается: тридцатичасовой обжиг оказывает такое же действие, как и трехчасовой.

Чтобы выяснить влияет ли на этот эффект окружающая атмосфера, был проведен обжиг в вакууме. Оказалось, что и в этом случае снижение угла диэлектрических потерь такое же, как и в предыдущих, т. е. 40%.

Изучение влияния обжига на угол диэлектрических потерь плавленного кварца в зависимости от температуры показало, что заметное влияние начинается лишь с 1000°C.

Все эти факты говорят о том, что снижение угла диэлектрических потерь в результате высокотемпературной термообработки происходит за счет внутренних изменений образца. Мы считаем, что в результате термообработки часть примесных ионов закрепляется путем комплексообразования, образования химического соединения и т. п., и, таким образом, не участвует в процессе прохождения тока через образец.

Рядом авторов [4], [5], [6] была показана возможность понижения проводимости твердых диэлектриков, в том числе и плавленного кварца, после

пропускания через них постоянного тока, который удаляет избыток примесных ионов, вызванный высокой температурой. Представляет интерес

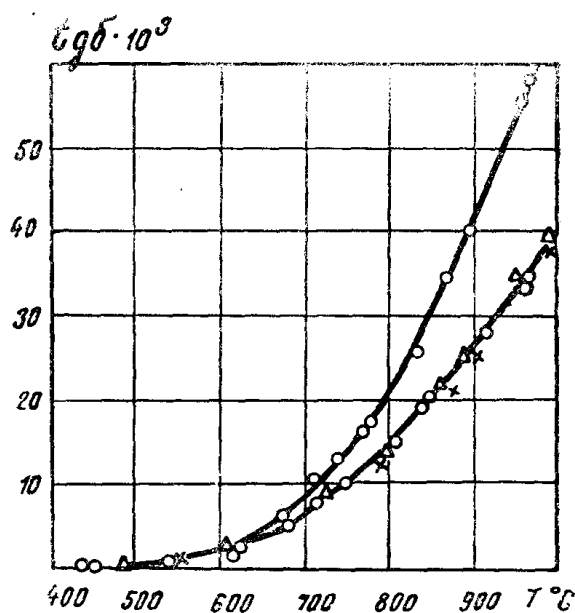


Рис. 10. О — необожженный образец; Δ — электроочистка после обжига;
нижняя кривая — после обжига;
× — шлифовка поверхн. кварц ПС 17.

выяснить влияние электроочистки на величину высокотемпературных диэлектрических потерь в плавленом кварце.

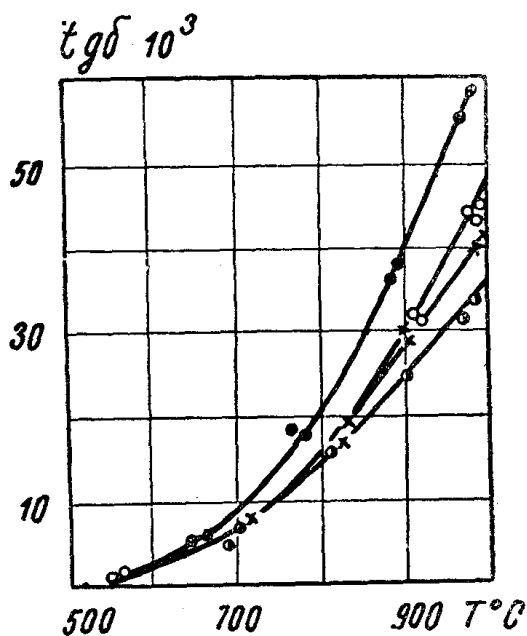


Рис. 11. Кварц ПС 23 ($l = 0,19$ см.)
● — необработ. образец О — электроочистка
× — прогрев при 500°C ◐ — обжиг при 1200°C, 3 часа.

Электроочистка производилась при температуре 500°C в течение 5—8 часов. Величина постоянного напряжения, прикладываемого при этом к образцу, составляла 600 в.

Нами было изучено влияние электроочистки на угол диэлектрических потерь кварца при частоте 25 мГц. Результаты этих исследований, представленные на рис. 11, показывают, что высокотемпературные диэлектрические потери в плавленом кварце снижаются после электроочистки. Это уменьшение одинаково для всех исследуемых видов плавленого кварца и составляет примерно 30%.

Вторичная электроочистка не вызывает дальнейшего изменения угла диэлектрических потерь.

Выяснение влияния совместного действия высокотемпературной термообработки и электроочистки на величину угла диэлектрических потерь плавленого кварца показывает, что:

1) электроочистка после обжига (рис. 10) не оказывает заметного влияния на величину угла диэлектрических потерь;

2) термообработка после электроочистки дополнительно снижает величину угла диэлектрических потерь до уровня, обусловленного одной только

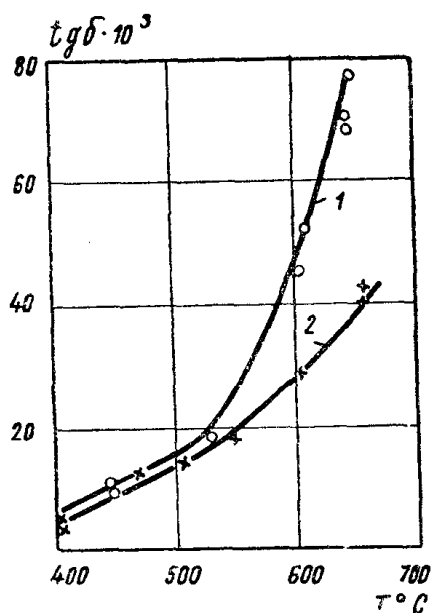


Рис. 12. Проба VIII

1 — $E = 1,03$ кВ/см; 2 — $E = 0,43$ кВ/см.

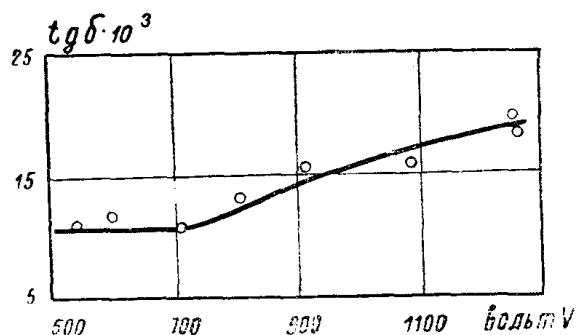


Рис. 13. Проба VIII (1) $T = 510^{\circ}\text{C}$.

термообработкой, что свидетельствует, повидимому, о том, что они действуют на один и тот же сорт ионов.

Таким образом, закрепление части примесных ионов при обжиге или удаление их при электроочистке приводит к улучшению электроизолирующих свойств плавленого кварца.

Большой интерес представляют опыты с образцами кварца из пород, которые содержат значительное количество газовых включений. Измерение температурной зависимости угла диэлектрических потерь этих образцов показало (рис. 12), что при некоторой температуре, характерной для данного образца, угол диэлектрических потерь начинает резко расти. Измерение при меньшем напряжении показало исчезновение этого явления в области исследуемых температур.

В связи с этим было проведено исследование зависимости угла диэлектрических потерь от напряжения при температуре, близкой к началу резкого возрастания температурной зависимости его. Рис. 13, представляющий эту зависимость, воспроизводит известную картину ионизационных потерь.

Об этом же свидетельствуют имеющиеся разряды в порах, наблюдаемые в виде вспышек в толще образца.

Таким образом, наличие в плавном кварце газовых включений неблагоприятным образом сказывается на величине угла диэлектрических потерь. Наряду с потерями проводимости возникают ионизационные потери, приводящие к резкому нагреву диэлектрика в высокочастотном поле.

Заключение

Проделанная работа позволяет заключить следующее.

1. Усовершенствована калориметрическая методика измерения угла диэлектрических потерь, которая позволяет выполнить исследование плавного кварца при высоких температурах и повышенных напряжениях в диапазоне частот 10—40 мГц с достаточной степенью точности.

2. В результате исследования диэлектрических потерь в плавном кварце установлено, что:

а) высокотемпературные диэлектрические потери в прозрачном плавном кварце являются потерями проводимости, величина которых определяется количеством и степенью закрепления присутствующей в образце примеси;

б) удаление части примесных ионов при электроочистке или закрепление их при обжиге приводит к снижению угла диэлектрических потерь;

в) диэлектрические потери в образцах, содержащих газовые включения, состоят из потерь проводимости и ионизационных потерь. Последние обуславливают высокое значение угла диэлектрических потерь этих образцов, зависимость величины угла диэлектрических потерь от напряжения и более резкое возрастание его с температурой.

В заключение выражаю благодарность К. А. Водопьянову за руководство работой. Считаю своим долгом отметить также большую помощь в работе со стороны первого руководителя А. М. Вендеровича.

ЛИТЕРАТУРА

1. H. H. Race, C. Leonard.—Trans. Amer. Inst. El. Eng. 55. 1936.
2. А. В. Лыков.—Теплопроводность нестационарных процессов, Госэнергоиздат, 1952.
3. А. П. Александров, А. Ф. Вальтер и др.—Физика диэлектриков. ГТТИ. 1932.
4. А. А. Шапошников.—ЖРФХО ч. физ. 42, 8, 1910.
5. Л. Г. Ченцова и Н. Е. Веденеева.—ДАН СССР, т. LXVIII, № 2, 1949.
6. N. g. Rahimi—j. Phys. Rad, t. 9, № 7 (291), 1938.

Сибирский физико-технический
институт

ВОПРОСЫ И ОТВЕТЫ

М. С. Мецник—Учитывались ли потери тепла на излучение?

Б. И. Ворожцов—Было показано, что до 5 минут можно потери не учитывать.

Г. И. Скана ви—Как определялось распределение потенциала между воздухом и кварцем?

Б. П. Ворожцов—Из схемы замещения с учетом диэлектрических потерь.

Г. И. Скана ви—Каков диэлектрический нагрев образцов?

Б. П. Ворожцов—Примерно 3° , возможно больше. При повышенных температурах всегда больше.

Г. И. Скана ви—Когда начинаются ионизационные потери?

Б. П. Ворожцов—При температуре 300° и напряженности поля $E = 1 \text{ кв/см.}$

Р. Л. Мюллер—Известно ли Вам, что при температуре $300\text{—}400^\circ$ резко снижается энергия диссоциации ионов натрия?

Б. П. Ворожцов—Да, однако, спектроскопические исследования показали, что ионов натрия или нет или меньше 0,001.

Р. Л. Мюллер—Указывает, что чистейший борный ангидрид имеет некоторое количество натрия (от 0,01 до 0,001%).

По его подсчетам при температуре около 500° наблюдается возбуждение валентных связей, т. е. освобождение ионов натрия. Убежден, что подъем $\lg \delta$ с температурой в кварце обусловлен ионами натрия.

Г. И. Скана ви—Работа Ворожцова представляет собой большой шаг вперед. До сих пор калориметрический метод не давал точных результатов. Важно, что работа проведена для кварца, имеющего большое применение. Доклад Ворожцова один из лучших, которые заслушаны на совещании.
